

Manufacturing method for monolithic multi-layer piezoceramic actuator with microfaults provided in actuator joints parallel to inner electrodes

Publication number: DE10234787
Publication date: 2003-10-30
Inventor: HEINZMANN ASTRID (DE); HENNIG EBERHARD (DE); KOPSCH DANIEL (DE); PERTSCH PATRICK (DE); RICHTER STEFAN (DE); WEHRSDORFER EIKE (DE)
Applicant: PI CERAMIC GMBH KERAMISCHE TEC (DE)
Classification:
- international: **H01L41/047; H01L41/083; H01L41/24; H02N2/04; H01L41/00; H01L41/083; H01L41/24; H02N2/02**; (IPC1-7): H01L41/22; H01L41/083; H02N2/04
- European: H01L41/047; H01L41/083; H01L41/24
Application number: DE20021034787 20020730
Priority number(s): DE20021034787 20020730; DE20021025405 20020607

Report a data error here

Abstract of DE10234787

The manufacturing method has a stacked device provided by a quasi mechanical series circuit formed from a number of piezoplates (2) by sintering green foils, with inner electrodes (3,4) incorporated in the plate stack fed to its opposing side surfaces for connection in parallel electrode groups via metallisation layers (5). Microfaults (8) are provided in the actuator joints along the stack longitudinal axis parallel to the inner electrodes and adjacent the opposing side surfaces, e.g. by preventing sintering of the green foils, for provision of internal stress points. An independent claim for a monolithic multi-layer actuator is also included.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



⑩ **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑪ **Patentschrift**
⑫ **DE 102 34 787 C 1**

⑬ Int. Cl. 7:
H 01 L 41/22
H 02 N 2/04
H 01 L 41/063

⑭ Aktenzeichen: 102 34 787.5-35
⑮ Anmeldetag: 30. 7. 2002
⑯ Offenlegungstag: -
⑰ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 30. 10. 2003

DE 102 34 787 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑱ Innere Priorität:
102 25 405. 2 07. 06. 2002
⑲ Patentinhaber:
Pi Ceramic GmbH Keramische Technologien und
Bauelemente, 07509 Lederhose, DE
⑳ Vertreter:
Meissner, Bolte & Partner, 80538 München

㉑ Erfinder:
Heinzmann, Astrid, 07549 Gera, DE; Hennig,
Eberhard, 07646 Stadtroda, DE; Kopsch, Daniel,
04988 Großtreben-Zwethau, DE; Pertsch, Patrick,
07629 Hermsdorf, DE; Richter, Stefan, 07927
Hirschberg, DE; Wehrsdorfer, Eike, 07607
Eisenberg, DE
㉒ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
DE 40 29 972 A1
DE 39 40 619 A1
EP 10 65 736 A2
EP 08 44 678 A1
WO 00/79 607 A1

㉓ Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors, monolithischer Vielschichtaktor aus einem
plazokeramischen oder elektrostriktiven Material

㉔ Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung ei-
nes monolithischen Vielschichtaktors, einen entsprechen-
den Vielschichtaktor sowie eine Außenkontaktierung für
einen monolithischen Vielschichtaktor. Erfindungsgemäß
sind entlang der Stapelungsachse des Aktors im wesent-
lichen parallel zu den Innenelektroden, von diesen bean-
sachtet, im Bereich der mindestens zwei gegenüberlie-
genden Außenflächen, zu denen die an sich bekannten In-
nenelektroden herausgeführt sind, gezielt Mikroströ-
rungen im Aktorgefüge eingebaut, welche frühestens beim
Polarisieren des Aktors einen vorgegebenen, begrenzten,
spannungsabbaubewirkenden Wachstum in das Innere und/
oder zur Außenelektrode unterliegt, wobei weiterhin die
Grundmetallisierung und/oder Außenkontaktierung min-
destens im Bereich der Mikroströrunge im Aktorgefüge
dehnungsresistent oder elastisch ausgebildet ist.

DE 102 34 787 C 1

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material, wobei der Aktor als Stapelanordnung in quasi mechanischer Reihen-
schaltung einer Vielzahl von Piezoplaten durch Sintern durch Grönfolien ausgebildet wird, vorhandene Innenelektroden im Stapelstapel zu gegenüberliegenden Außenflächen des Platten geführt und dort mittels Grundmetallisierung sowie Außenkontaktführung jeweiliger Elektrodengruppen parallel verschalten sind gemäß Oberbegriff des Patentanspruchs 1. Weiterhin betrifft die Erfindung einen monolithischen Vielschichtaktors aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material, wobei der Aktor eine Stapelanordnung von Piezoplaten ist, welche über innere Elektroden, eine gemeinsame Grundmetallisierung sowie Außenkontaktführung verfügt gemäß Oberbegriff des Patentanspruchs 13.

[0002] Piezokeramische Aktoren sind elektro-mechanische Wandler, bei denen der reziproke piezoelektrische Effekt ausgenutzt wird. Trägt man an eine piezokeramische Platte mit Elektroden auf ihren Hauptflächen, die in Richtung der Plattendicke polarisiert ist, eine elektrische Feld an, so kommt es zu einer Pormänderung. Konkret vollzieht sich eine Ausdehnung in Richtung der Plattendicke, wenn das angelegte elektrische Feld parallel zum ursprünglichen Polungsfeld gerichtet ist. Gleichzeitig kommt es senkrecht zur Feldrichtung zu einer Kontraktion.

[0003] Durch Überlappenderapielen einer Vielzahl solcher Platten im Sinne einer mechanischen Reihenschaltung und elektrischer Parallelschaltung der Platten, können so die Deformationen der einzelnen Platten addiert werden. Bei einem Dehnvermögen von etwa 0,1-0,2% bei Belastungen von 2 kV/mm lassen sich so Auslenkungen von etwa 1 µm pro mm Bauhöhe realisieren.

[0004] Bei monolithischen Vielschichtaktoren erfolgt das Stapeln bereits im grünen Zustand und die endgültige Verbindung wird durch Sintern vorgenommen. Hierbei werden bis zu einigen hundert piezokeramische Grönfolien alternierend mit metallischen Innenelektroden gestapelt, verpresst und zu einem monolithischen Körper gesintert. Die Innenelektroden werden dabei wechselseitig auf die gegenüberliegenden Flächen bis zur jeweiligen Oberfläche herausgezogen und dort im Regelfall durch eine Grundmetallisierung in Dick- oder Dünnschichtausführung miteinander verbunden. Dieses Design wird auch als Ausführung mit Interdigital-elektroden bezeichnet. Ein piezoelektrischer Aktor umfasst also piezokeramische Schichten und Gruppen von inneren Elektroden, die jeweils auf gegenüberliegenden Flächen bis zu die Oberfläche führen. Eine Grundmetallisierung dient der Parallelschaltung der jeweiligen Elektrodengruppe. Weiterhin sind inaktive Bereiche vorhanden, die weder beim Polarisieren noch beim üblichen Betrieb des Aktors piezoelektrisch geschaltet werden.

[0005] Diese inaktiven Bereiche in den Multilayern mit interdigitalen Elektroden stellen ein kritisches Moment für die Verarbeitbarkeit und Zuverlässigkeit derartiger Produkte bzw. unter Rückgriff auf solche Produkte realisierter Ferkzeugengruppe dar. Aufgrund der hohen Zug-Spannungskonzentrationen in den inaktiven Bereichen und in Verbindung mit der geringen Zugfestigkeit der piezokeramischen Werkstoffe kommt es bereits bei der Polarisierung, die mit remanenten Dehnungen von bis zu 0,3% verbunden ist oder aber später beim Betrieb zu unerwünschten Rissbildungen.

[0006] Die vorgenannte unkontrollierte Rissbildung hat verschiedene Ausfallmechanismen der Aktoren zur Folge. Setzt sich das Risswachstum in das Innere des Aktors fort,

kann dies einerseits zur mechanischen Zerstörung des Aktors führen, andererseits können hierdurch bedingt innere Überschläge auftreten, wenn der Riss von einer Elektroden-schicht zur anderen wächst. Mit einer geeigneten Prozessführung kann das Risswachstum in das Innere des Aktors begrenzt werden. Nicht verhindert werden kann allerdings das Risswachstum in Richtung der Aktoroberfläche. Bruch der Riss in die Aktoroberfläche, führt dies zur Unterbrechung der auf der Oberfläche aufgetragenen Grundmetallisierung. Hierdurch werden Teilbereiche des Aktors galvanisch von der Spannungsversorgung abgetrennt und infolge dessen treten elektrische Überschläge an den Unterbrechungen der Grundmetallisierung auf. Diese Überschläge wiederum sind der Grund, die letztendlich zum Totalausfall des Aktors führen.

[0007] Zur Überwindung der zitierten Rissproblematik sind eine Vielzahl von Lösungen bekannt, die entweder die Verhinderung der Rissbildung oder bei nicht zu vermeidenden unkontrollierten Rissbildungen ein Reduzieren oder Eliminieren von Überschlägen an der Grundmetallisierung auf die Oberfläche durch zusätzliche Maßnahmen zum Ziel haben.

[0008] Die JP 58-196/77 offenbart einen Multilayer-Aktor und ein Verfahren zu seiner Herstellung, bei dem entlang der Aktorachse eine Vielzahl von Schlitzen mit einer Tiefe von etwa 0,5 mm parallel zu den inneren Elektroden in den Aktor eingebracht wird. Diese Schlitze führen ähnlich wie die aus anderen Bereichen der Technik bekannten Dehnungsfugen zum Abbau von Spannungskonzentrationen und verhindern somit eine unkontrollierte Rissbildung oder ein Wachstum des Risses in Aktorgefüge. Nachteil ist jedoch die Tatsache, dass durch diese Schlitze auch der tragende Querschnitt des Aktors im Einsatz verringert. Beim angegebenen Beispiel reduziert sich der tragende Querschnitt des Aktors auf $3 \times 3 \text{ mm}^2$ bei einem Gesamtquerschnitt von $4 \times 4 \text{ mm}^2$. Das zitierte Verfahren, bei dem die Schlitze durch thermisch zersehbare Schichten auf den grünen Keramikfolien beim Sintern gebildet werden, weist auch auf weitere Probleme hin, die beim Sintern zu einem ebenfalls unkontrollierten Risswachstum führen können und die nur durch spezielle aufwendige Ausgestaltungen der inneren Elektroden verholbar sind. Als Ursache für die Rissbildung beim Sintern wird dort die inhomogene Verdichtung des grünen Stapels beim Verpressen erwähnt.

[0009] Bei der EP 0 844 678 A1 wird ebenfalls auf die Problematik der Rissbildung und deren Folgen eingegangen, wenn durch die Risse die Grundmetallisierung zerstört wird.

[0010] Zur Vermeidung von Schädigungen des Aktors wird dort vorgeschlagen, zwischen der Spannungsversorgung und der Grundmetallisierung eine dreidimensional strukturierte elektrische leitfähige Elektrode einzufügen, die nur partiell mit der Grundmetallisierung verbunden ist und die zwischen den Kontaktstellen dehnbar ausgebildet wird. Die praktische Realisierung einer solchen dreidimensionalen Struktur erfordert aber einen sehr hohen Aufwand, da die partiellen Kontaktstellen einen definierten Abstand in der Größenordnung des Abstandes der inneren Elektroden haben müssen.

[0011] Bei der Anordnung für eine sichere Kontaktführung von piezoelektrischen Aktoren nach DIN 196 46 676 C1 wird an der als Kontaktstellen ausgebildeten Grundmetallisierung eine elektrische leitende Kontaktfühne mit hoher Rissfestigkeit so angebracht, dass im überstehenden Bereich der Kontaktfühne verbleibt. Dabei muss der überstehende Bereich der Kontaktfühne so groß ausgebildet werden, dass auftretende Risse die Kontaktfühne nicht vollständig durch-

treten. Eine solche Anordnung ist aber sehr empfindlich beim Handling. Bekanntlich besitzt die Grundmetallisierung an der Oberfläche des piezokeramischen Aktors nur eine sehr geringe Schichtstärke. Bereits geringe Schallkräfte führen zur Ablösung der Grundmetallisierung von der Aktoroberfläche und somit zum teilweisen oder vollständigen Verlust der elektrischen Kontaktierung zu den Innenelektroden.

[0012] Eine weitere Variante, das Risswachstum vom Aktorkörper zur Oberflächelektrode zu einkoppeln ist in der DE 160 17 331 C1 offenbart. Dort wird vorgeschlagen, zwischen Grundmetallisierung und Außenelektrode eine elektrisch leitende Pulverschicht einzubringen. Eine solche Anordnung verhindert zwar den Rissfortschritt, ist aber technisch nur unter erheblichen Aufwendungen zuverlässig zu realisieren, da der elektrische Kontakt der Pulverschichten mit der inneren und äußeren Elektrode und untereinander nur über Berührung erfolgt, was einen Kontaktmindestdruck erfordert. Weiterhin sind berührungslose Kontakte sehr stark gegenüber Korrosionserscheinungen unfähig.

[0013] Die WO 00/79607 A1 und WO 00/63980 A1 offenbaren Lösungen, die darauf abzielen, jede der an der Oberfläche herausgeführten Elektroden einzeln zu kontaktieren. Bei Elektrodenabständen von 50-250 µm ist dies jedoch nicht kostengünstig umsetzbar.

[0014] Aus dem Vorgenannten ist es daher Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material anzugeben, mit dessen Hilfe es gelingt einen Aktor mit hoher Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität zu schaffen, welcher darüber hinaus in der Lage ist, hohen Druckkräften bei geringem Aktorquerschnitt stand zu halten. Weiterhin ist es Aufgabe der Erfindung einen monolithischen Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material zu schaffen, wobei dieser neuartige Aktor über verbesserte Gebrauchseigenschaften verfügen soll.

[0015] Die verfahrensmässige Lösung der Aufgabe der Erfindung erfolgt mit einer Lehre in der Definition nach Patentanspruch 1.

[0016] Bezüglich des Vielschichtaktors selbst sei auf die Merkmalskombination nach Anspruch 13 verwiesen.

[0017] Die Umrissansprüche stellen jeweils zweckmäßige Ausgestaltungen und Weiterbildungen des Erfindungsgegenstandes dar.

[0018] Der Grundgedanke der Erfindung liegt unter Berücksichtigung der in den Ansprüchen konkretisierten Lehre darin, entlang der Aktorachse und im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden im Bereich der mindestens zwei gegenüberliegenden Aussenflächen, zu denen die inneren Elektroden wechselseitig herumgeführt werden, Mikroströmungen im Aktorgefüge so einzurichten, dass diese als quasi im vorbekannten Ort stehende Risquelle wirken, wobei das Risswachstum kontrollierbar ist. Die Aussenkontaktierung wird durch eine in Ansicht bekannte Weise mittels Dicken- oder Dünnschichttechnologie realisierte Grundmetallisierung gebildet, wobei die Elektrodenbereiche zwischen den Orten der Mikroströmungen und inbegriffen, nach außen reichende Risse durch eine dehnungsresistente, zweite Aussen-elektrode miteinander verbunden werden.

[0019] Durch den gezielten Einbau von Gefügeschwächungen, die als potentielle Risquelle wirken, kann eine weitere Risbildung gezielt gesteuert werden. Bei einem Abstand der Risquellen im Bereich von ein 1-4, bevorzugt 2-3 mm werden die inneren mechanischen Spannungen so abgebaut, dass in den Abschnitten zwischen den Risquellen auch bei zyklischer Belastung von weit über 10^9 Zyklen keine weitere Risbildung beobachtet wird.

[0020] Von erfindungswesentlicher Bedeutung ist, dass die gezielt eingebrachten Mikroströmungen im Aktorgefüge selbst noch keinen Riss im eigentlichen Sinne darstellen. Der gezielt gesteuerte Riss entsteht erst nach der Polarisierung des Aktors und zwar nur in dem Umfang, wie beim Polarisieren remanente Dehnungen gegeben sind. Dadurch, dass das Gefüge beim Scheitern des Aufbringens der Grundmetallisierung noch geschlossen ist, dringt auch keine Metallisierungsmasse in das piezokeramische Material ein, was zu einer wesentlichen Qualitätsverbesserung derartiger realisierter Aktoren führt.

[0021] Die Mikroströmungen verhindern örtlich begrenzt das Zusammenstossen der Grünflächen mit dem Ergebnis einer dezidierten Delaminierung.

[0022] Zum Erreichen dieses Delaminierungszustands besteht die Möglichkeit im Bereich gewünschten Mikroströmungen beim Stapelanbau einer Schicht oder Mergen eines organischen Binders aufzubringen, welche einen Volumenanteil von bis zu 50% organischer Partikel mit einem Durchmesser ≤ 200 nm enthält, die beim Sinterprozess nahezu vollständig austreten.

[0023] Diese vorgeschriebene Schicht kann durch Siedruck aufgebracht werden und wird vor dem Sintern durch Pressen derart verdichtet, dass die in den Grünflächen eingebetteten Keramikpartikel sich nur teilweise oder nicht berühren, um gezielt ein Zusammenstossen ganz oder teilweise zu unterbinden.

[0024] Alternativ besteht die Möglichkeit die Mikroströmungen durch eine Menge anorganischer Füllpartikel mit einem Durchmesser von ≤ 1 µm auszubilden, wobei diese Füllpartikel nicht mit den piezoelektrischen Werkstoff des Stapels reagieren. Die Füllpartikel werden in an sich bekannter Weise dem Binder zugesetzt und stellen ein Bestandteil des Letzteren dar.

[0025] Bei einer weiteren Ausführungsform besteht die Möglichkeit die Mikroströmungen durch Keramrisse zu induzieren, wobei diese Keramrisse entweder im grünen oder gesinterten Zustand erzeugt wurden, ohne jedoch die tragende Querschnittsfläche des Aktorstapels zu reduzieren.

[0026] Dadurch, dass die Lage potentieller Risse durch das definierte Hindernis der Mikroströmungen bekannt ist, besteht die Möglichkeit in Kenntnis dieser Position sehr Lage die Aussenkontaktierung auszugestalten. Die Aussenkontaktierung besteht jeweils aus einer flächigen Biegeelektrodelektrode, welche mit der Grundmetallisierung mindestens im Bereich zwischen den Mikroströmungen elektrisch in Verbindung steht.

[0027] Konkret kann die flächige Biegeelektrode einen aufgetrockneten Kapitol/Berylliumstreifen umfassen, wobei der Streifen jeweils offene Ellipsenform aufweisende Abschnitte umfasst. Die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipsen verläuft im Bereich der jeweiligen Mikroströmung.

[0028] Bei einer Alternative ist die Biegeelektrode als Mäandrier- oder Doppel-mäandrierlektrode ausgeführt, wobei die Verbindungsabschnitte des Mäandriers jeweils im Bereich der Mikroströmungen verlaufen.

[0029] Auf den Biegeelektroden befinden sich Über-schneide oder Lötlunkte zur Kontaktierung mit der Grundmetallisierung und/oder zur weiteren Verdröhtung.

[0030] Die Stapelanordnung, welche den Aktor bildet, umfasst elektrodentreue passive Endschichten als Kraftkopplungsflächen.

[0031] Der Abstand der ersten Mikroströmung zur passiven Endschicht ist gleich dem ganzen oder halben Abstand der übrigen, über die Längsachse verteilten Mikroströmungen gewählt.

[0032] Der erfindungsgemäße Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material weist ent-

lung der Stapelungsachse im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden definierender Mikrogefäßgestörungen auf, wobei durch die Zugfestigkeit im Vergleich zum umgebenden Gefüge bei gleichzeitiger Erhaltung der Druckfestigkeit das Weichen verringert ist.

[0033] Weiterhin besitzt der monolithische Vielschichtaktortypus eine dehnungsresistente, flächige Aussenelektroden, welche nur punktförmig mit der Grundmetallisierung im Bereich zwischen den definierenden Mikrogefäßgestörungen verbunden ist.

[0034] Die Aussenelektrode kann in einer Ausführungsform als Mäander oder Doppelmäander mit Biegeelenk-funktion gestaltet sein. Auch besteht die Möglichkeit diese Aussenelektrode als Anordnung offener Hilfspinns im Sinne eines Hilfspinns mit Biegeelenkfunktionen auszubilden, wobei zwischen den Ellipsen im wesentlichen in Richtung der Nebachsen verlaufend ein Verbindungs- und Kontaktierungsriegel vorhanden ist.

[0035] Die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipsen der Aussenelektrode verläuft im wesentlichen im Bereich der Mikrogefäßgestörungen. Dort möglicherweise entstehende, nach aussen führende Risse ziehen keine elektrische Unterbrechung der Kontaktierung nach sich.

[0036] Am oberen und/oder unteren Ende des Aktors ausgebildete passive Endschichten können als monolithische Isolatorschicht ausgebildet werden, welche Koppellemente trägt oder aufnimmt.

[0037] Zusammenfassend liegt der Lösungsansatz der Erfindung darin, gezielt in dem Aktormaterial für Gefäßschwächungen Sorge zu tragen, so dass an dann bekannten Stellen Risse entstehen und zwar erstmals dann, wenn der Aktor einer Polarisation unterworfen wird. Dadurch, dass die Lage der gezogenen Risse bekannt ist, kann durch eine entsprechende drehbare Elektrodenkonfiguration dafür gesorgt werden, dass eine elektrische Kontaktierung in jedem Fall sicher stattfindet bzw. erhalten bleibt.

[0038] Bekanntermaßen findet ein Risswachstum im wesentlichen senkrecht zur Aktorlängsachse und zwar in beiden Richtungen, das heißt sowohl ins Innere des Aktors hinein als auch nach aussen zur Grundmetallisierung hin statt. Dies ist üblicherweise ein negativer Effekt. Da aber erfindungsgemäß die Aussenkontaktierung aufgrund der bekannten Lage der Risse modifizierbar ist, können potentielle Risse von vornherein überblickt werden und es werden die im Stand der Technik gezeigten Ausfallerscheinungen reduziert.

[0039] Gemäß dem Stand der Technik ist es notwendig eine möglichst hohe Anzahl von Kerben oder Schlitz, insbesondere auch im Endbereich des Aktors einzubringen, da die Spannungsverhältnisse im Aktor selbst nicht bekannt sind, jeder die entsprechenden Kerben oder Schlitz führt aber zu einer verringerten mechanischen Stabilität und damit Belastbarkeit des Aktors selbst.

[0040] Bei der vorliegenden Erfindung werden zwar gezielte Gefügeveränderungen eingebaut, die potentiell auch einen Riss nach sich ziehen können, wenn entsprechende Spannungen auftreten, dies ist aber nicht vergleichbar mit einer von vornherein unabwendbaren mechanischen Schwächung des Gefüges durch einen Schlitz, der beispielsweise durch Krüben, Einkerbungen oder ähnlich erzeugt wird. Die aus dem Stand der Technik bekannten Schlitz entsprechen einem Materialabtrag. Der materialabgetragene Bereich des Aktors leistet aber augenscheinlich keinen Festigkeitsbeitrag mehr.

[0041] In dem Falle, wenn in die Biegeschicht größere, ein zusammenhängend verbindende Partikel eingebracht worden verleiht der vorteilhafte Effekt, dass eine Tragfähigkeit oder Kraftübernahme durch diese Partikel gewähr-

leistet ist, die einen nicht unwesentlichen Beitrag zur Gesamtstabilität leisten. Hierbei ist wesentlich, das beim Aktor selbst nur Druckkräfte in Richtung der Aktorlängsachse entstehen.

[0042] Die Kerbanrisse nach der Erfindung sind keinesfalls vergleichbar mit den makroskopischen Kerben nach dem Stand der Technik. Hier handelt es sich vielmehr um im Mikrometerbereich liegende Rindrisse, die quasi mit den Rindrissen eines Probekörpers, wie aus der Materialprüfung bekannt, vergleichbar sind.

[0043] Wie oben erläutert, ist dafür Sorge zu tragen, dass bei dem Überlappenden der einzelnen Polspalten zwischen ausgewählten Bereichen von Folien oder Schichten ein Delaminationseffekt eintritt. Dieses bedeutet, dass dort eine Zugbeanspruchung nicht möglich ist, jedoch die benachbarten Folien so dicht aufeinanderliegen, dass eine Druckkraftübertragung möglich wird und zwar im Gegensatz zu den Bereichen mit Schlitz oder Kerbe nach dem Stand der Technik.

[0044] Bei einer Ausführungsform kann der Abstand zwischen zwei wechselseitig herausgeführten Elektroden in einem oberen und/oder unteren Endbereich des Aktors doppelt so groß sein, wie zu den darunterliegenden, benachbarten Elektroden. Aufgrund des größeren Abstandes ist ein Hineinwandern eines durch das veränderte Mikrogefäßbedingten Risses in den Elektrodenbereich und damit ein Unterbrechen der Elektrode im Inneren des Aktors vermindert. Der Nachteil einer dort vorliegenden anderen Feldstärke wird auf jeden Fall vom Vorteil des aktiven Leistungsbeitrages des Aktors in diesem Bereich aufgehoben.

[0045] Der Erfindung soll nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen sowie unter Zuhilfenahme von Figuren näher erläutert werden.

[0046] Hierbei zeigen:

[0047] Fig. 1 eine prinzipielle Stapelbauanordnung nach dem Stand der Technik;

[0048] Fig. 2a ein erfindungsgemäßer Aktor vor der Polarisation;

[0049] Fig. 2b ein Aktor nach der Polarisation;

[0050] Fig. 3a eine Ausführungsform der Aussenkontaktierung mit Mäanderelektrode;

[0051] Fig. 3b eine Ausführungsform der Aussenelektrode mit offenen Ellipsen;

[0052] Fig. 4a eine Schemadarstellung eines erfindungsgemäßen Aktors mit verändertem Abstand gegenüberliegender Innenelektroden in vorgegebenen Endbereichen und

[0053] Fig. 4b eine Seitenansicht eines solchen eines erfindungsgemäßen Aktors mit erkennbarer Elektrodenanordnung in Form von Biegeelenken, ausgebildet als offene, durch Stege verbundene Ellipsen.

[0054] Die in der Fig. 1 gezeigte Ausführungsform eines Vielschichtaktors nach dem Stand der Technik geht von einer Interdigitalelektrodenanordnung aus. Mit dem Bezugszeichen 1 ist der Aktor selbst, mit dem Bezugszeichen 2 sind die piezokeramischen Schichten benannt. Die inneren Elektroden 3 und 4 sind jeweils auf die gegenüberliegenden Flächen bis an die Oberfläche herangeführt. Die Grundmetallisierung 5 dient der Parallelschaltung der jeweiligen Elektrodengruppe. Ein inaktiver Bereich 6 des Aktors 1 wird beim Polarisieren noch beim Betrieb des Aktors 1 piezoelektrisch gedehnt und bildet ein Spannungspotential.

[0055] Der erfindungsgemäße Aktor gemäß dem Ausführungsbeispiel nach den Fig. 2a und 2b umfasst piezokeramische Schichten 2 mit einer Dicke im Bereich von 20-100 µm. Diese Schichten sind durch innere Elektroden 3 und 4, vorzugsweise bestehen aus einer Ag/Pd-Legierung miteinander verbunden, die wechselseitig auf gegenüberlie-

gende Oberflächen herausgeführt sind.

[0056] Die 10rasausgezogene Elektroden 3, 4 werden über eine Grundmetallisierung 5, die auf den Seitenoberflächen aufgebracht wird, miteinander verbunden, so dass eine elektrische Parallelschaltung der einzelnen piezoelektrischen Schichten resultiert.

[0057] Im Bereich 6, der nicht bis zur Oberfläche herausgezogene Elektroden 3, 4 entstehen aufgrund der inhomogenen elektrischen Feldverläufe in bekannter Weise bei der Polarisation oder beim Betrieb des Aktors mechanische Spannungskonzentrationen, insbesondere Zugspannungen, die letztendlich Ursache für eine unerwünschte, unkontrollierte Risssbildung sind.

[0058] Durch den gezielten Einbau von Gefäßschwächungen, die als Risquelle 7 wirken, kann die Risssbildung gesteuert werden.

[0059] Bei einem Abstand der Risquellen 7 im Bereich von 1-4 mm, bevorzugt 2-3 µm können die inneren mechanischen Spannungen so abgebaut werden, dass in den Abschnitten zwischen den Risquellen, auch bei Belastungen von weit über 10^5 Zyklen keine weitere Risssbildung beobachtet wird.

[0060] Fig. 2b zeigt den erfindungsgemäßen Aktor nach der Polarisation. Hier ist die Entspannungswirkung schematisch dargestellt. Von der Risquelle 7 geht dabei einerseits ein gezieltes Risswachstum 8 in das Innere des Aktors aus, welches durch eine geeignete energiesenkende Gefügesteuerung selbst gestoppt oder unterbrochen wird.

[0061] Andererseits ergibt sich aber auch ein Risswachstum in die Grundmetallisierung an der Stelle 9 hinein, welches im ungünstigsten Fall zur Durchtrennung der Grundmetallisierungsschicht 5 führt.

[0062] Beim gezeigten Ausfühungsbeispiel erfolgt die elektrische Verbindung der einzelnen Bereiche durch einen bogenförmig verlegten Draht 10, der punktuell über einen Lötspunkt 11 mit der Grundmetallisierung verbunden ist.

[0063] Die vorstehend erwähnten Risquellen sind auf verschiedene Weise in den Aktor integrierbar. Grundsätzlich gibt es, an vorbestimmten Stellen ein Zusammensetzen der aufeinandergegrasteten und verpressten Grünföhen ganz oder partiell zu verhindern, so dass an diesen Stellen die Zugfestigkeit im Vergleich zum umgebenden Gefüge verringert ist. Vorstehendes wird dadurch erreicht, dass in den vorgegebenen Bereichen beim Aufbau der Stapel eine Schicht eines organischen Binders durch Niederdruck aufgetragen wird, die mit einem Volumenanteil von bis zu 50% mit organischen Partikeln mit einem Durchmesser < 200 nm, die beim Sinterprozess vollständig ausbrennen, gefüllt ist. [0064] Diese Schicht wird in den weiteren Verfahrensschritten oder Verarbeitungsschritten beim Verpressen auf eine Dicke < 1 µm zusammengepresst und sorgt dafür, dass die in den Grünföhen eingebetteten Keramikföher sich nicht oder nur partiell beröhren, so dass beim Sintern der Materialtransport von Korn zu Korn ganz oder teilweise verhindert ist.

[0065] Eine alternative Möglichkeit besteht darin, dass anstelle organischer Pöhlpartikel anorganische Partikel mit einem Durchmesser < 1 µm, die nicht mit dem piezoelektrischen Werkstoff reagieren, wie z. B. ZrO_2 oder Pulver eines geöterten PZT-Werkstoffes mit einer für wesentlichen gleichen Zusammensetzung wie der Aktorwerkstoff dem Binder zugesetzt werden.

[0066] Auch können Risquellen dadurch erzeugt werden, indem entweder im grünen oder im gesinterten Zustand Mikro-Keramikfasern eingeföht werden.

[0067] Der oben beschriebene Abbau der inneren mechanischen Spannungen durch eine gezielte Risseinbringung in den Aktor bündelt gegenüber den bekannten Lösungen we-

sentliche Vorteile. So wird z. B. der belastbare Querschnitt des Aktors nur unwesentlich verringert, da die gezielt erzeugten Risflächen bei Einwirkung einer Druckkraft in Richtung der Aktorachse aufeinandergepresst werden und somit zum tragenden Querschnitt beitragen.

[0068] Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sich der Riss frühestens beim Polarisieren öfnet und somit beim Anbringen der Grundmetallisierung keine Metallpartikel in das Innere des Aktors gelangen können. Hierdurch ergibt sich eine wesentlich verbesserte Qualität entsprechend gestuöter Aktoren im Vergleich zum Stand der Technik.

[0069] Ein Vorteil besteht auch darin, dass für eine sichere und langzeitstabile elektrische Kontaktierung des Aktors eine einfache, dehnungsresistente Ausselektrode realisierbar ist, die nur punktuell mit der Grundmetallisierung zwischen den Entspannungsrissen zu verbinden ist.

[0070] Eine Ausgestaltung einer dehnungsresistenten bzw. elastischen Ausselektrode 12 in Schlitz- oder Mäandrierform zeigt Fig. 3a. Dort sind auch passive Indschichten 14 ohne innere Elektroden gezeigt, die eine Kräftekopplung bilden. Diese Indschichten 14 können z. B. aus einem amöhlischen Isolationsmaterial bestehen und dienen der Aufnahme von verschiedenen Koppellementen.

[0071] Eine ebenso mit passiven Indschichten 14 versehene Ausfühungsform des Aktors zeigt Fig. 3b.

[0072] Dort ist eine Festkörperlagerung umfassende Ausselektrode in Form von offenen Ellipsen 13 vorhanden. Die Hauptachse der jeweiligen öffenen Ellipse verläuft im wesentlichen im Bereich erwöhter Risse. Die einzelnen Ellipsen weisen Siege 15 auf, die der elektrischen Kontaktierung der Ellipsen 13 untereinander dienen. Im Bereich der Siege 15 ist jeweils ein Lötspunkt 11 ausgebildet.

[0073] Gemäß der Ausfühungsform nach Fig. 3 ist der Abstand vom ersten Entspannungsriss 7 zur passiven Indschicht 14 gleich dem Abstand der Entspannungsrisse untereinander gewöhlt. Bei der zweiten Ausfühungsform nach Fig. 3b betrögt der Abstand des ersten Entspannungsrisses 7 zur passiven Indschicht 14 gleich dem halben Abstand der öbrigen Spannungsrisse untereinander.

[0074] Die Fig. 4a öffnet einen in bestimmten Abschnitten des Aktors vorhandenen grööeren Abstand der inneren Elektroden 3 und 4. Dieser doppelte Abstand im Vergleich zu benachbarten inneren Elektroden reduziert die Gefahr, dass ein dazwischen befindlicher Riss 7 zu den inneren Elektroden wandert und deren Kontaktierung hin zur Grundmetallisierung bzw. entsprechende elektrische Verbindung unterbricht.

[0075] Die in den Fig. 3a und 3b schematisch gezeigte flöchige Gestaltung der z. B. aus Kupfer-Berylliummaterial bestehenden Ausselektrode ist nur beispielhaft zu verstehen. Grundsätzlich ist jede flöchige Ausselektrodenform geöignet, die in lateraler Richtung zerstörungsfrei Dehnungs- bzw. Spannungskräfte aufnehmen kann.

Bezugszeichenliste

- 1 Aktor
- 2 piezoelektrische Schicht
- 3, 4 innere Elektroden
- 5 Grundmetallisierung
- 6 inaktiver Bereich des Aktors
- 7 Mikrogefögeänderung
- 8 durch Polarisation ausgelöster gezielter Mikroriß
- 9 Unterbrechung der Grundmetallisierung
- 10 bogenförmig verlegter Draht
- 11 Lötspunkt
- 12 mäandrierörmige Ausselektrode
- 13 Ellipse einer entsprechend ausgebildeten Ausselektrode

trode

14. Fischereiche der Aktors, bevorzugt als monolithische Fischereische ausgeführt

15. Verfindungssteg der Ellipseform - Aussonderungskierung

Patentsprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material, wobei der Aktor als Stapelanordnung in quasi mechanischer Reihenschaltung einer Vielzahl von Piezoplaten durch Sintern von Grünfolien ausgebildet wird, vorhandene Innenelektroden im Plattenstapel zu gegenüberliegenden Aussentflächen des Stapels geführt und dort mittels Grundmetallisierung sowie Aussonderungskierung jeweiliger Elektrodengruppen parallel verschalten sind, **dadurch gekennzeichnet**, dass entlang der Stapelungsachse im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden, von denen bestehend, im Bereich der mindestens zwei gegenüberliegenden Aussentflächen, zu denen die Innenelektroden herausgeführt sind, gezielt Mikrostörungen im Aktorgefüge eingebaut werden, welche frühestens beim Polarisieren des Aktors einem vorgegebenen, begrenztem, spannungsabhängenden Wachstum in das Innere des Aktors unterliegen und weiterhin die Grundmetallisierung und/oder die Aussonderungskierung mindestens im Bereich der Mikrostörungen im Aktorgefüge dehnungsresistent oder elastisch ausgebildet ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Mikrostörungen örtlich begrenzt ein Zusammensintern der Grünfolien verhindern.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass im Bereich der Mikrostörungen beim Stapelbau eine Schicht oder Menge eines organischen Binders aufgebracht wird, welche einen Volumenanteil von bis zu 50% organischer Partikel mit einem Durchmesser ≤ 200 nm enthält, die beim Sinterprozess nahezu vollständig ausbreiten.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Schicht durch Siebdruck aufgebracht wird, wobei diese Schicht vor dem Sintern durch Pressen derart verdichtet wird, dass sie in den Grünfolien eingebetteten Keramikpartikel sich nur teilweise oder nicht berühren, um gezielt ein Zusammensintern ganz oder teilweise zu unterbinden.
5. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Mikrostrukturen durch eine Menge anorganischer Füllpartikel mit einem Durchmesser von $\leq 1 \mu\text{m}$, welche nicht mit dem piezoelektrischen Werkstoff des Stapels reagieren, ausgebildet sind, wobei die Füllpartikel dem Binder zugesetzt werden.
6. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Mikrostrukturen durch Korbanrisse induziert sind, welche entweder in grünem oder gesinterten Zustand erzeugt werden, jedoch ohne die inliegende Querschnittsfläche des Aktorstapels zu reduzieren.
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Aussonderungskierung in Kenntnis der Lage der eingebrachten oder vorgezeichneten Mikrostrukturen erstellt wird, wobei die Aussonderungskierung jeweils eine flächige Biegeelektrode umfasst, welche mit der Grundmetallisierung mindestens im Bereich zwischen den Mikrostrukturen punktuell oder abschnittsweise elektrisch in Verbindung steht.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet,

net, dass die Biegeelektrode aus einem aufgelöteten Kupfer/Beryllium-Streifen besteht und der Streifen jeweils offene Ellipsenform aufweisende Abschnitte umfasst, wobei die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipse jeweils im Bereich einer der Mikrostrukturen verläuft.

9. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Biegeelektrode als Mäander- oder Doppelmäanderelektrode ausgeführt ist, wobei die Verbindungsabschnitte des Mäanders jeweils im Bereich der Mikrostrukturen verlaufen.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass auf den Biegeelektroden Lötabschnitte oder Lötunkte zur weiteren Verdringung vorgesehen sind.

11. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass auf die Stapelanordnung elektrodenfreie passive Endschichten als Kraftkoppelflächen aufgebracht worden.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand der ersten Mikrostruktur zur passiven Endschicht gleich dem ganzen oder halben Abstand der übrigen über die Längsachse verteilten Mikrostrukturen gewählt wird.

13. Monolithischer Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material, wobei der Aktor eine Stapelanordnung von Piezoplaten ist, welche über innere Elektroden, eine geteilte Grundmetallisierung sowie Aussonderungskierung verfügt, dadurch gekennzeichnet, dass entlang der Stapelungsachse im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden, dehnungsverstärkende Mikrogefügestörungen vorhanden sind, welche die Zugfestigkeit im Vergleich zum umgebenden Gefüge bei gleichzeitigem Erhalt der Druckfestigkeit des Stapels verringern.

14. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 13, gekennzeichnet durch eine dehnungsresistente, flächige Aussenelektrode, welche nur punktuell mit der Grundmetallisierung im Bereich zwischen den dehnungsverstärkenden Mikrogefügestörungen verbunden ist.

15. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Aussenelektrode ein flächig strukturierter Kupfer/Beryllium-Streifen ist.

16. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Aussenelektrode die Form eines Mäanders oder Doppelmäanders mit Biegeelektroden aufweist.

17. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Aussenelektrode die Form eines Mäanders, offener Ellipsen mit Biegeelektroden aufweist, wobei zwischen den Ellipsen im wesentlichen in Richtung der Nebenchsen ein Verbindungs- und Kontaktierungssteg vorhanden ist.

18. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipsen der Aussenelektrode im wesentlichen im Bereich der Mikrogefügestörungen verläuft.

19. Monolithischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 13 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass elektrodenfreie passive Endschichten am oberen und/oder inneren Ende des Aktors ausgebildet sind.

20. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die passiven Endschichten eine monolithische Isolationsschicht umfassen.

sen, welche Koppelglieder tragen oder aufnehmen,

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

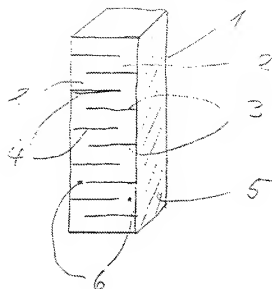


Fig. 1

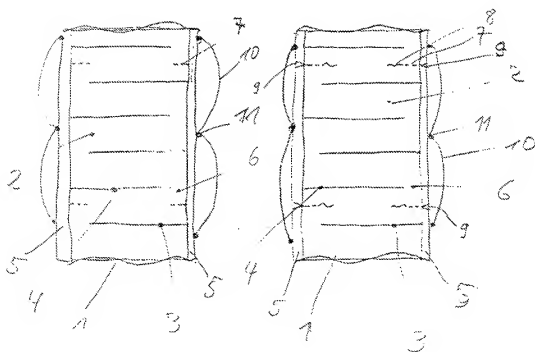
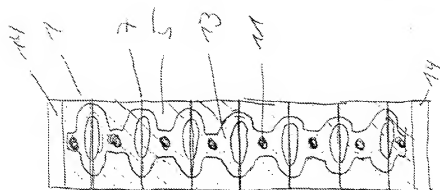
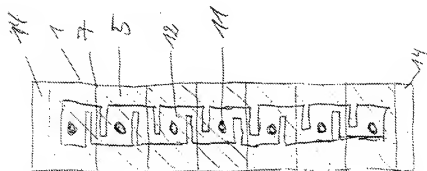


Fig. 2 A

B

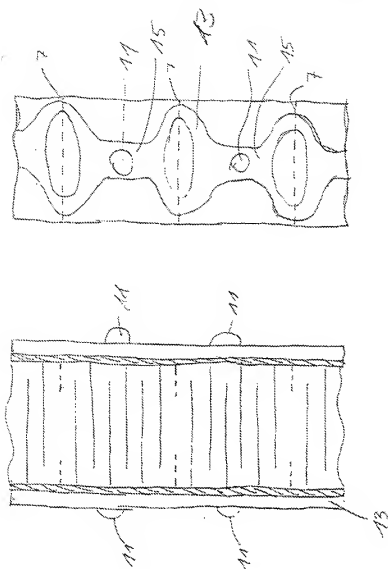


B



A

Fig. 3



B

A

Fig. 4